Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 85 (1994)

Heft: 23

Artikel: Optimierter Einsatz von Messwandlern : elektronische Systeme rufen nach einer neuen Abstimmung der Messwandler mit Signalübertragung, Schutz und Messung

Autor: Kull, Ulrich

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-902632

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 15.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Für konventionelle Messwandler in Verbindung mit elektronischen Schutz- und Messgeräten in elektrischen Hoch- und Mittelspannungsanlagen werden die Zusammenhänge zwischen der Bebürdung und den Leistungsanforderungen unter Berücksichtigung der Signalübertragung aufgezeigt. Der niedrige Leistungsbedarf elektronischer Systeme erlaubt eine entsprechende Senkung der Wandlerleistungen im allgemeinen. Dazu wird auch das Abrücken von gegebenenfalls unnötigen Genauigkeits- und Linearitätsansprüchen sowie Grenzstrombedingungen begründet und empfohlen. Die dadurch erzielbaren Vereinfachungen und Einsparungen eröffnen neue Entwicklungsmöglichkeiten und sind technisch und wirtschaftlich in jeder Hinsicht von wachsender Bedeutung.

Optimierter Einsatz von Messwandlern

Elektronische Systeme rufen nach einer neuen Abstimmung der Messwandler mit Signalübertragung, Schutz und Messung

■ Ulrich Kull

In elektrischen Hoch- und Mittelspannungsanlagen kommen – auch in Verbindung mit elektronischen Komponenten für die Signalverwertung – vorwiegend noch konventionelle Strom- und Spannungswandler zum Einsatz. In den nachfolgenden Betrachtungen geht es deshalb in erster Linie um dieses Anlagenkonzept und nicht um zukünftige integrierte Systeme mit optoelektronischen Sensoren, Signalübertragungskanälen und Leitrechnern.

Die heutigen Schutz- und Messgeräte auf vorwiegend elektronischer Basis zeichnen sich gegenüber den früheren elektromechanischen Apparaten durch einen wesentlich geringeren Leistungsbedarf aus. Sie belasten die Messwandler normalerweise mit einer Bürde von unter 1 VA oder sogar unter 0,5 VA. Es gibt aber auch mechanische Verrechnungszähler nach dem Ferraris-Prinzip mit einem sehr niedrigen Leistungsbedarf. Dieser beträgt für den Strompfad <0,5 W und für den Spannungspfad <1,5 W, sofern man den Blindleistungsverbrauch kompensiert. Dem gegenüber stehen die bisher üblichen Leistungs-

Wandlerleistung Klasse	**5 VA** 5P20	**30 VA** 5P20	**60 VA** 5P20
Primärstrom [A]	600	600	600
Sekundärstrom [A]	5	5	5
Primärwindungszahl	1	1	2
Primärampèrewindungen [A]	600	600	1200
Primärleiterquerschnitt [mm²]	400	400	400
Primärleitergewicht [kg]	**1,5**	**1,5**	**3,85**
Kernquerschnitt [cm²]	9,2	30	31
Kerngewicht [kg]	**2,7**	**8,9**	**11**
Sekundärleiterquerschnitt [mm²]	2,5	2,5	2,5
Sekundärleitergewicht [kg]	**0,65**	**1,15**	**1,68**
HS-Isolationsdicke [mm]	20	20	20
HS-Isolationsgewicht [kg]	**2**	**2**	**4,5**
Materialgewicht [kg]	**6,9**	**13,6**	**21,0**

Tabelle I Gegenüberstellung von Stromwandlern unterschiedlicher Nennbürde

Adresse des Autors:
Ulrich Kull, Dipl. El.-Ing. ETH,
MGC Moser-Glaser & Co. AG,
Hofackerstrasse 24, 4132 Muttenz.

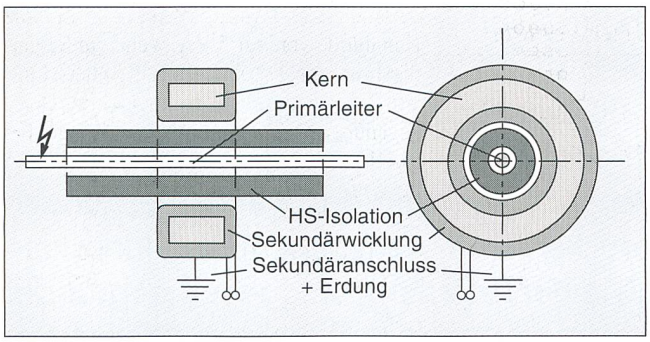

Bild 1 5-VA-Stromwandler

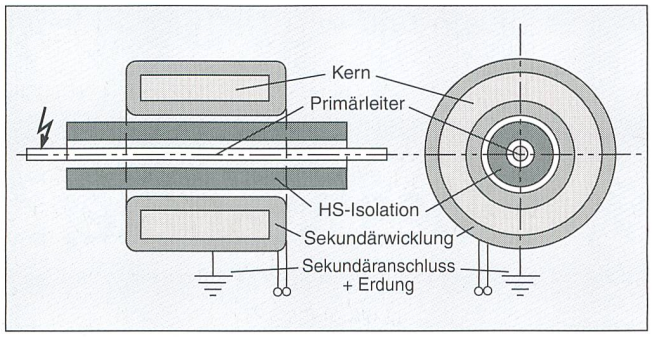

Bild 2 30-VA-Stromwandler

anforderungen an die Messwandler, welche von 10 bis 60 VA für Stromwandler und 30 bis 200 VA für Spannungswandler reichen. Vor allem im oberen Leistungsbereich führt dies in Verbindung mit hohen Anlagespannungen oftmals zu Geräten, deren Grösse und Gewicht allein schon visuell zum geringen Signalleistungsbedarf in keinem Verhältnis mehr stehen.

Allerdings gibt es berechtigte Gründe zum Festhalten an den hohen Wandlerleistungen, auch für Anlagen mit elektronischen Schutz- und Messsystemen. Dazu gehört die Forderung nach Austauschbarkeit der Messwandler mit solchen in bestehenden Anlagen mit höherem Leistungsbedarf oder nach Hilfsenergieversorgung aus dem Sekundärkreis im Falle von Spannungswandlern. Vor allem aber kann bei Stromwandlern der Verlustleistungsbedarf längerer Signalleitungen bei beschränktem Querschnitt dafür ausschlaggebend sein, besonders wenn bereits bestehende Leitungen bei einem Sekundärstrom von 5 A verwendet werden sollen. Angesichts der niedrigen Belastung, welche die elektronischen Geräte für die Wandler darstellen, bildet dann nämlich der Widerstand der Signalleitungen den Hauptanteil an deren Bürde.

Es sind aber in jüngster Zeit zunehmende Bestrebungen vorhanden, auf übersetzte Leistungsforderungen für Messwandler zu verzichten. Gleichzeitig setzt sich für Neuanlagen und Umrüstungen bei den Stromwandlern vermehrt ein sekundärer Nennstrom von 1 A anstelle der vielfach noch üblichen 5 A durch. Beides sind technisch und wirtschaftlich überaus sinnvolle Entwicklungen. Dies soll im folgenden durch Aufzeigen der entsprechenden Zusammenhänge nach Möglichkeit veranschaulicht werden.

Abstimmung induktiver Stromwandler auf die Mindestanforderungen für Schutz und Messung

Einfluss der Nennbürde auf die Wandlerauslegung

Anhand der drei Beispiele in Tabelle I soll gezeigt werden, in welchem Ausmass die Bebürdung die Abmessungen sowie den technischen und fabrikatorischen Aufwand beeinflussen kann.

Für Messbürden ≤1 VA und bei einem Verlustleistungsbedarf der Signalleitung von weniger als 3–4 VA genügt demnach in der Summe eine Nennbürde des Wandlers von 5 VA oder sogar weniger. Dies erlaubt gemäss Tabelle I und Bild 1 die Wahl eines entsprechend kleinen Kerns mit geringem Sekundärwicklungsvolumen und einem geraden, isolierten Primärleiter für den einfachsten Fall von Durchführungs- und Kabelumbauwandlern im Mittelspannungsbereich. Auffällig ist dabei die von der Hochspannung unbeeinflusste, leichte Zugänglichkeit von Erdung und Anschluss des Sekundärteils.

Bei erhöhter Leistungsanforderung von 30 VA muss nach Tabelle I und Bild 2 bei sonst gleichbleibenden Wandlerdaten für dieselbe einfache Anordnung ein wesentlich grösserer Sekundärteil mit rund dreifachem Gewicht und entsprechend höheren Materialkosten eingesetzt werden, so dass sich das Gesamtgewicht verdoppelt.

Steigt die Leistungsanforderung auf 60 VA, ist unter Umständen eine weitere Vergrösserung des Kernquerschnitts aus Platzgründen nicht mehr möglich, und es kommt nur noch eine Erhöhung der Primärwindungszahl in Frage. Gemäss Tabelle I und Bild 3 führt dies mit steigender Spannungsreihe zu einem wesentlich komplexeren Isolationsaufbau. Deshalb müssen Erdung und Anschluss des Sekundärteils in geeigneter Weise durch die Hochspannungsisolation hindurchgeführt werden. Insgesamt ergibt sich damit ein wesentlich grösserer Materialbedarf und vor allem auch ein viel höherer Fertigungsaufwand für den Sekundärteil, den Primärteil und die Isolation, wobei sich in diesem Fall das Gewicht mit entsprechender Kostenfolge auf den dreifachen Wert erhöht.

Aus dieser Gegenüberstellung von vereinfachten Prinzipmodellen für verschiedene Leistungen ist der markante Rückgang der Aufwendungen und der Komple-

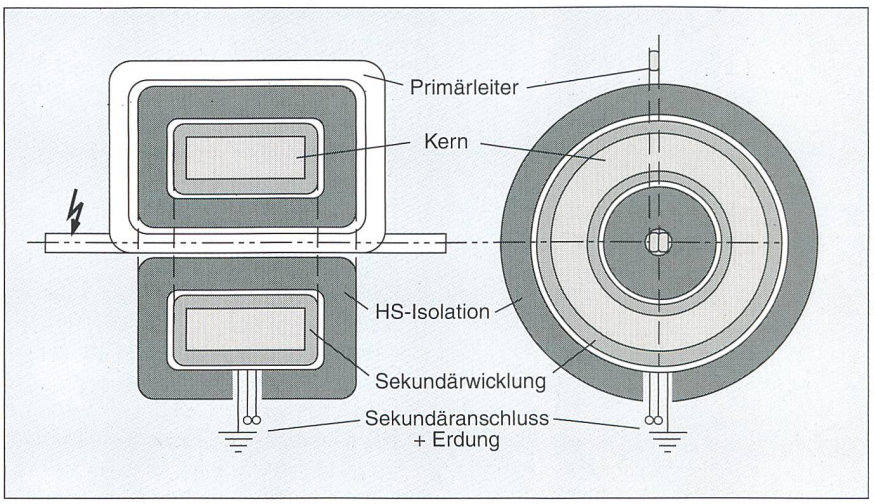

Bild 3 60-VA-Stromwandler

Leiterquerschnitte			Cu-Gewicht	Cu-Leiter-Verluste	
SEV/VDE [mm²]	AWG Nr.	[mm²]	[kg/100 m]	1 A [W/100 m]	5 A [W/100 m]
0,50	20	0,52	0,9	7,0	175,0
0,75	18	0,82	1,3	4,7	116,7
1,00	17	1,04	1,8	3,5	87,5
1,50	15	1,65	2,7	2,3	58,3
2,50	13	2,63	4,5	1,4	35,0
4,00	11	4,17	7,1	0,9	21,9
6,00	9	6,63	10,7	0,6	14,6
10,00	7	10,55	17,8	0,4	8,8
16,00	5	16,77	28,5	0,2	5,5
25,00	3	26,66	44,5	0,1	3,5

Tabelle II Querschnittstabelle mit Gewichten und Verlusten für Doppeldrahtleitung

xität von Stromwandlern mit sinkender Nennbürde klar zu erkennen. Dies gilt ganz besonders für die Mittelspannung, hat aber abgesehen von der ohnehin aufwendigen Isoliertechnik auch im Bereich der Hochspannung eine entsprechende Auswirkung auf Gewicht und Abmessungen.

Die Einflussgrössen im Sekundärkreis des Stromwandlers mit Messbürde und Signalleitung

Für jeden Wandlerkern lässt sich auf der Sekundärseite ein Stromkreis gemäss Bild 4 darstellen. Dabei gelten unter Vernachlässigung des geringen Lastwinkeleinflusses praktisch folgende einfache Zusammenhänge zwischen den einzelnen Grössen (mit S_W: Wandlerleistung [VA]; S_M: Messbürde [VA]; S_S: Signalleitungsbürde [VA]; P_S: Signalleiterverluste [W]):

$$S_W = S_M + S_S \quad (1)$$

$$S_M = I_S^2 \cdot Z_M \quad (2)$$

$$S_S \approx P_S = I_S^2 \cdot R_S \quad (3)$$

Für die Länge einer Signalleitung mit bestimmtem Querschnitt ergibt sich bei gegebener Wandlerleistung beziehungsweise Nennbürde und bekannter Messbürde ein zulässiger Maximalwert wie folgt (wobei A_S: Signalleiterquerschnitt [mm²], ρ_S = 0,0175 Ωmm²/m: spezif. Widerstand für Signalleiter aus Kupfer):

$$S_S \leq S_W - S_M \quad (S_M < S_W \text{ vorausgesetzt}) \quad (4)$$

$$R_S = 2 \cdot \rho_S \cdot l_S / A_S = (0{,}035\ \Omega\text{mm}^2/\text{m}) \cdot l_S / A_S \quad (5)$$

$$l_S \leq A_S \cdot (S_W - S_M) / 2 \cdot \rho_S \cdot I_S^2 = A_S \cdot (S_W - S_M) / [(0{,}035\ \Omega\text{mm}^2/\text{m}) \cdot I_S^2] \text{ für } S_M < S_W \quad (6)$$

Das Gewicht des Signalleiters in Abhängigkeit von Leitungslänge und Querschnitt beträgt (mit G_S: Signalleitergewicht [kg], l_s: Länge der Signalleitung, 2drähtig [m], A_S: Signalleiterquerschnitt [mm²], γ_S = 8,9 kg/dm³: spezif. Signalleitergewicht für Kupfer):

$$G_S = 2 \cdot l_S \cdot A_S \cdot \gamma_S = (0{,}0178\ \text{kg}) \cdot l_s \cdot A_s \quad (7)$$

Kriterien für die Bemessung der Signalleitung und für die Wahl des Sekundärstroms

Unter Verwendung der obigen Beziehungen sind in Tabelle II zu den in Betracht fallenden Leiterquerschnitten von Signalleitungen mit zwei Einzeldrähten aus Kupfer das Leitergewicht und die Leiterverluste für die Sekundärströme von 1 und 5 A per 100 m Länge aufgelistet.

Die zulässigen Signalleitungslängen in Abhängigkeit von der zur Deckung der Leiterverluste zur Verfügung stehenden Leistung und vom Leiterquerschnitt sind in den Bildern 5 und 6 für 1 A und 5 A Sekundärstrom grafisch aufgetragen.

Anhand dieser Grundlagen soll mit einigen ausgewählten Fällen gezeigt werden, in welchem Mass sich die Wandlerleistungen auch für längere Signalleitungen reduzieren lassen, sofern die Messbürde sehr niedrig ist. Wie vorteilhaft dabei die Wahl eines Sekundärstromes von 1 A ist, geht in der nächsten Betrachtung aus den Ergebnissen in Tabelle III hervor. Danach genügt offensichtlich für eine Messbürde von 1,5 VA bis zu einer Leitungslänge von 250 m eine Nennbürde von nur 5 VA, wenn ein Sekundärstrom von 1 A und ein Leiterquerschnitt von 2,5 mm² zur Anwendung kommt. Demgegenüber verkürzt sich diese Länge bei gleicher Nenn- und Messbürde für einen Sekundärstrom von 5 A auf lediglich 16 m, auch wenn ein Leiterquerschnitt von 4 mm² zur Verfügung steht. Sogar bei einer extremen Querschnittserhöhung auf 25 mm² liegt in diesem Fall die maximale Leitungslänge erst bei 100 m, wobei im Vergleich zur Lösung mit 1 A und 2,5 mm² bei jeweils gleicher Leitungslänge die 10fache Kupfermenge benötigt wird.

Aus einer weiteren Darstellung von Fällen mit gegebener Länge und gegebenem Querschnitt der Signalleitung in Tabelle IV geht deutlich hervor, um wieviel niedrigere Wandlerleistungen bei einem Sekundärstrom von 1 A ausreichen. So erlaubt zum Beispiel eine bereits bestehende Signalleitung von 250 m Länge mit einem Leiterquerschnitt von 4 mm² den Einsatz eines Wandlers von lediglich 3–4 VA für niedrige Messbürden von 0,5 bis 1,5 VA, sofern ein Sekundärstrom von 1 A gewählt wird. Dagegen benötigt man für die gleiche Signalleitung bei 5 A eine Wandlerleistung von gegen 60 VA, und zwar zum weitaus grössten Teil zur Deckung der Leitungsverluste, welche gegenüber 1 A das 25fache betragen. Wäre die Leitung nur 150 m lang oder hätte sie einen Leiterquerschnitt von 6 mm², würde sogar bei 1 A eine Nennbürde von nur 2–3 VA je nach Messbürde ausreichen, während bei 5 A noch immer gegen 40 VA nötig wären.

Abschliessend sei noch für die Signalleitung allein eine vereinfachte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung mit Verlustkapitalisierung zur Beurteilung des Einflusses von Sekundärstrom und Leiterquerschnitt angestellt. Dazu dienen nachfolgende Formeln (mit ρ_S: spezif. Widerstand Signalleiter [Ωmm²/m], k_S: Signalleitungspreis

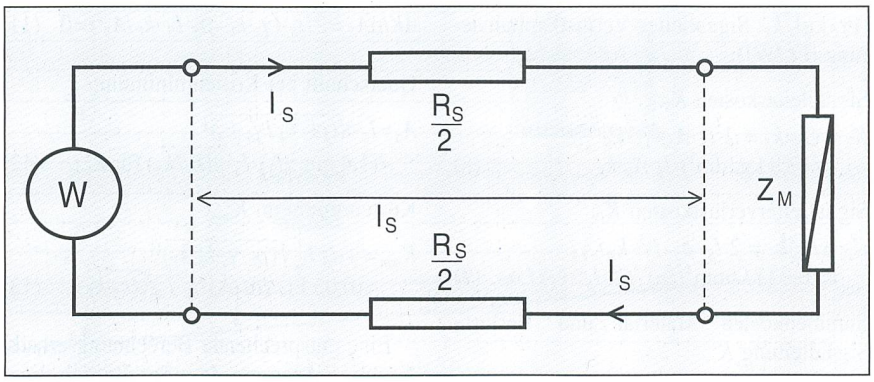

Bild 4 Sekundärkreis eines Stromwandlers

W bewickelter Wandlerkern als Stromquelle
Z_M Messimpedanz von Zähler bzw. Schutzrelais [Ω]
l_s Länge der Signalleitung (2drähtig) [m]
I_s Sekundärstrom [A]
R_S Signalleitungswiderstand [Ω]

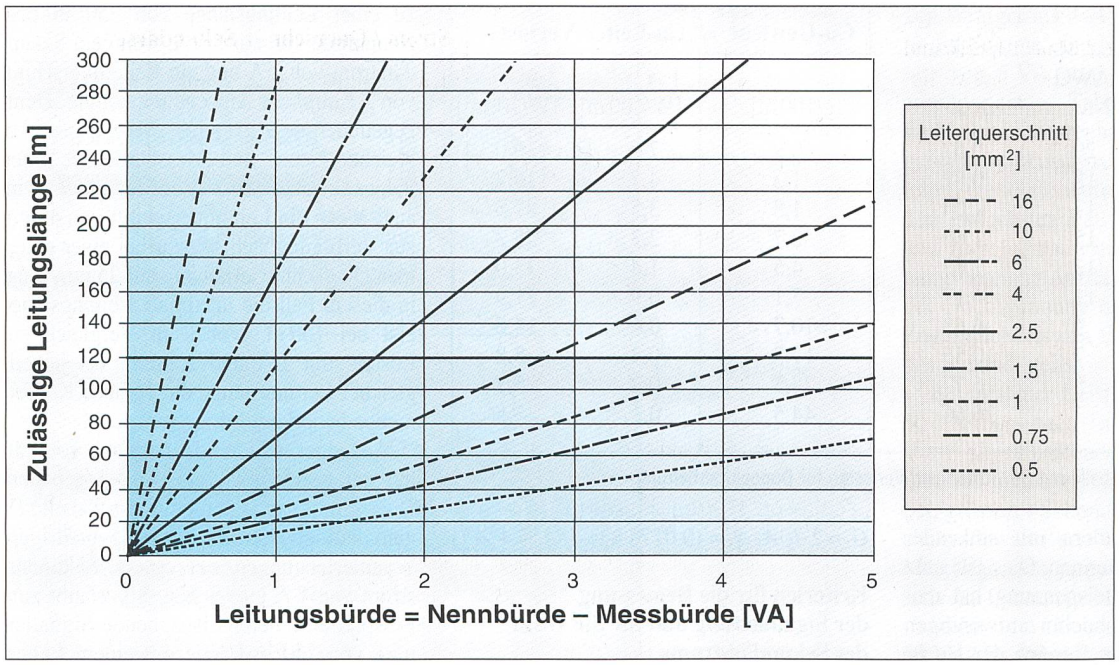

Bild 5 Zulässige Leitungslänge in Funktion der Leitungsbürde bei 1 A

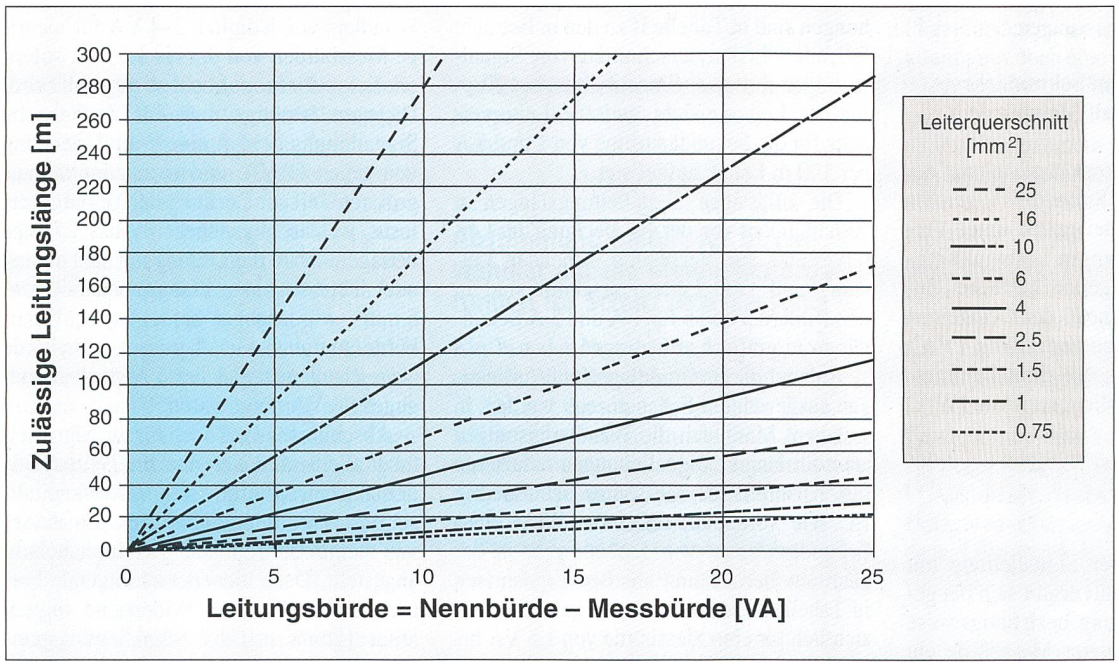

Bild 6 Zulässige Leitungslänge in Funktion der Leitungsbürde bei 5 A

[Fr./kg], k_P: Signalleiter-Verlustkapitalisierung [Fr./W]):

Signalleiterkosten K_S:

$$K_S = G_S \cdot k_S = 2 \cdot l_S \cdot A_S \cdot \gamma_S \cdot k_S = (17{,}8\ \mathrm{kg/dm^3}) \cdot l_S \cdot A_S \cdot k_S \quad (8)$$

Signalleiterverlustkosten K_P:

$$K_P = P_S \cdot k_P = 2 \cdot l_S \cdot \rho_S \cdot I_S^2 \cdot k_P / A_S = (0{,}035\ \Omega\mathrm{mm^2/m}) \cdot (l_S \cdot I_S^2 \cdot k_P) / A_S \quad (9)$$

Summenkosten Material und Verluste Signalleitung K:

$$K = K_S + K_P = 2 \cdot l_S \cdot A_S \cdot \gamma_S \cdot k_S + 2 \cdot l_S \cdot \rho_S \cdot I_S^2 \cdot k_P / A_S) \quad (10)$$

Minimumbestimmung der Summenkosten in Funktion des Signalleiterquerschnitts:

$$\mathrm{d}K/\mathrm{d}A_S = 2 \cdot l_S \cdot (\gamma_S \cdot k_S - \rho_S \cdot I_S^2 \cdot k_P / A_S^2) = 0 \quad (11)$$

Querschnitt bei Kostenminimum:

$$A_S = I_S \cdot \sqrt{(\rho_S \cdot k_P / \gamma_S \cdot k_S)} \approx (1{,}4\ \mathrm{mm^2/A}) \cdot I_S \cdot \sqrt{(k_P / k_S)} \text{ für } K_{min} \quad (12)$$

Kostenminimum K_{min}:

$$K_{min} = 4 \cdot l_S \cdot I_S \cdot \sqrt{(\rho_S \cdot \gamma_S \cdot k_S \cdot k_P)} \approx (0{,}05\ \mathrm{Fr./(m \cdot A)}) \cdot l_S \cdot I_S \cdot \sqrt{(k_S \cdot k_P)} \quad (13)$$

Eine entsprechende Berechnung erlaubt die klare Aussage, dass der Betrieb einer Signalleitung für alle in Frage kommenden Leiterquerschnitte unabhängig von deren Länge bei 1 A durchwegs kostengünstiger ausfällt als bei 5 A. Dies lässt sich aus der grafischen Darstellung in Bild 7 ablesen und ist angesichts des grossen Unterschieds bei den Leitungsverlusten auch nicht weiter erstaunlich. Darin ist der Verlauf der Kostensumme aus Leitermaterial und Verlustkapitalisierung in Abhängigkeit vom Leiterquerschnitt für beide Sekundärströme aufgetragen. Alle übrigen Kosten für die Leitungserstellung werden als angenähert unabhängig von Querschnitt und Strom angenommen und deshalb in dieser Grundsatzbetrachtung vernachlässigt.

Das Minimum der Summenkosten liegt für 1 A bei einem Leiterquerschnitt von ungefähr 1 mm² und ist 5mal kleiner als dasjenige für 5 A bei ≈5 mm². Der Kostenverlauf liegt denn auch für 1 A im gesamten,

interessierenden Bereich deutlich tiefer als für 5 A. Daher können Materialpreis und Verlustkapitalisierung relativ stark variieren, ohne dass sich an der grundsätzlichen Aussage der Darstellung etwas ändert. Der dargestellte Kurvenverlauf besagt überdies, dass die Wahl eines etwas grösseren Leiterquerschnitts oberhalb des theoretischen Optimums kostenmässig nicht stark ins Gewicht fällt. Dies gilt für 5 A wegen des flachen Kurvenverlaufs, aber insbesondere auch für 1 A wegen der durchwegs niedrigeren Kosten innerhalb des weiten Bereichs von 1 bis 6 mm². Deshalb kann der Querschnitt der Signalleitung ohne allzu grosse Mehrkosten so gewählt werden, dass die ohmschen Leiterverluste eine möglichst geringe Wandlerleistung absorbieren.

Im Falle sehr niedriger Schutz- und Messbürden macht somit die Wahl von 1 A Sekundärstrom die Verwendung leistungsarmer Wandler mit Nennbürden von wenigen VA sogar für längere Signalleitungen problemlos möglich und ist auch im Hinblick auf die Signalleitungskosten vom wirtschaftlichen Standpunkt aus empfehlenswert.

Auswirkung von Kontaktwiderständen in Abhängigkeit vom Sekundärstrom

Unabhängig von den Betrachtungen des vorhergehenden Abschnitts ist auch bei kurzen Signalleitungen mit vernachlässigbarer Leitungsbürde die Wahl eines Sekundärstroms von 1 A gegenüber 5 A von Vorteil, sofern man die Möglichkeit einer Widerstandszunahme an Kontaktübergängen nicht grundsätzlich ausschliessen kann. Dies ist ganz einfach dem Umstand zu verdanken, dass zur Deckung unvorhergesehe-

	Strom / Querschnitt Sekundärseite		
	1 A/2,5 mm²	5 A/4 mm²	5 A/25 mm²
Vorgabe:			
Nennbürde Wandlerkern [VA]	5	5	5
Sekundärstrom [A]	1	5	5
Messbürde [VA]	1,5	1,5	1,5
Leitungsquerschnitt [mm²]	2,5	4	25
Spezif. Widerstand Leiter [Ωmm²/m]	0,0175	0,0175	0,0175
Ergebnisse:			
Zulässige Leitungsbürde [VA]	3,5	3,5	3,5
Leitungsverluste [W]	3,5	3,5	3,5
Leitungsstromdichte [A/mm²]	0,4	1,25	0,2
Leitungswiderstand [Ω]	3,5	0,14	0,14
Cu-Gewicht Leitung [kg]	11,1	1,1	44,5
Zulässige Leitungslänge [m]	**250**	**16**	**100**

Tabelle III Zulässige Leitungslänge bei kleiner Nennbürde

	Strom / Messbürde Sekundärseite		
	1 A/1,5 VA	1 A/0,5 VA	5 A/1,5 VA
Vorgabe:			
Sekundärstrom [A]	1	1	5
Messbürde [VA]	1,5	0,5	1,5
Leitungslänge [m]	250	250	250
Leitungsquerschnitt [mm²]	4	4	4
Spezif. Widerstand Leiter [Ωmm²/m]	0,0175	0,0175	0,0175
Ergebnisse:			
Leitungsbürde [VA]	2,2	2,2	54,7
Leitungsverluste [W]	2,2	2,2	54,7
Leitungsstromdichte [A/mm²]	0,25	0,25	1,25
Leitungswiderstand [Ω]	2,2	2,2	2,2
Cu-Gewicht Leitung [kg]	17,8	17,8	17,8
Minimale Wandlerleistung [VA]	**3,7**	**2,7**	**56,2**

Tabelle IV Erforderliche Wandlerleistung bei gegebener Signalleitung

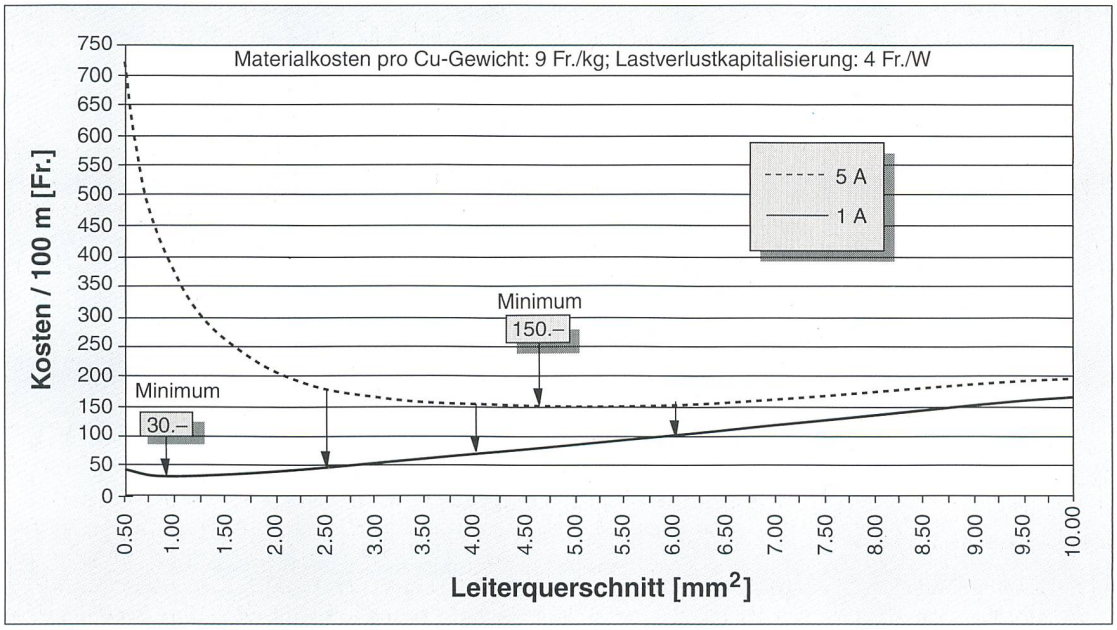

Bild 7 Kostenminimum der Signalleitung mit Verlustkapitalisierung in Funktion des Leiterquerschnitts

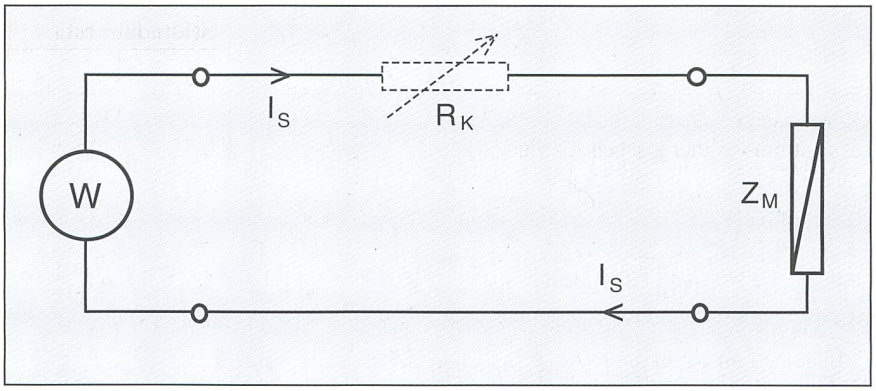

Bild 8 Sekundärkreis eines Stromwandlers mit Kontaktwiderstand

W bewickelter Wandlerkern als Stromquelle
I_S Sekundärstrom [A]
Z_M Messimpedanz von Zähler bzw. Schutzrelais [Ω]
R_K Kontaktwiderstand [Ω]

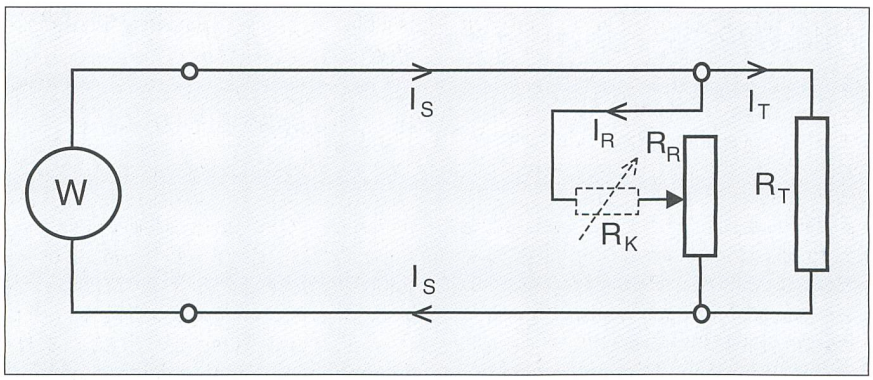

Bild 9 Sekundärkreis von Stromwandler für thermisches Abbild mit Einstellwiderstand

W bewickelter Wandlerkern als Stromquelle
R_T Widerstand des thermischen Abbilds [W]
R_R Regulierwiderstand [Ω]
R_K Kontaktwiderstand [Ω]
R_R+R_K Shuntwiderstand [Ω]
I_S Sekundärstrom [A]
I_T Strom im thermischen Abbild [A]
I_R Strom im Regulierwiderstand [A]

ner Spannungsabfälle bei 1 A Sekundärstrom bis zum Genauigkeitsverlust eine 5fach höhere Klemmenspannung zur Verfügung steht und zudem eventuell erhöhte Kontaktwiderstände durch eine 25mal kleinere Verlustleistung erhitzt werden.

Ohne Widerstand der Signalleitung wird der Sekundärkreis eines Stromwandlers auf die Darstellung in Bild 8 reduziert. In diesem vereinfachten Modell soll der Übergangswiderstand an den Kontaktstellen je nach deren Güte als variable Grösse von 0 bis ∞ angenommen werden.

Ersetzt man in den Formeln (1)–(7) S_S durch S_K, P_S durch P_K und R_S durch R_K, ergeben sich folgende Beziehungen (mit S_W: Wandlerbürde [VA], S_M: Messbürde [VA], S_K: Restbürde zur Deckung der Kontaktverluste [VA], P_K: Kontaktverluste [W]):

$$S_K = S_W - S_M \text{ für } S_M < S_W \quad (14)$$

$$P_K \approx S_K \quad (15)$$

$$R_K = P_K / I_S^2 \quad (16)$$

Aus Tabelle V geht hervor, dass bei gegebener Messbürde von 1 VA ein Wandler mit einer Nennbürde von 5 VA bis zu einem Kontaktwiderstand von 4 Ω mit Sicherheit ohne Genauigkeitseinbusse betrieben werden kann, wenn er für einen Sekundärstrom von 1 A ausgelegt wurde. Hingegen fällt dieser Grenzwert für den Kontaktwiderstand bei einem Sekundärstrom von 5 A auf den 25mal kleineren Wert von nur noch 160 mΩ. Dabei wäre in beiden Fällen an den Kontakten eine Verlustleistung von 4 W abzuführen. Bei 5 A würden sich aber diese Verluste in einem Kontaktwiderstand von 4 Ω auf ganz beträchtliche 100 W erhöhen. Ein Wandler mit einer Nennbürde von 60 VA würde die dafür notwendige Leistung auch durchaus erbringen, aber zusätzlich zur Gefahr einer unkontrollierbaren Kontaktüberhitzung seine Klassengenauigkeit verlieren. Daraus ist klar ersichtlich, um wieviel weniger kritisch sich ein Kontaktproblem bei einem Sekundärstrom von 1 A insbesondere auch für kleine Nennbürden auf den Genauigkeitsverlust oder die Kontakterhitzung auswirkt.

In diesem Zusammenhang soll auch an ein spezifisches Problem mit Durchführungsstromwandlern bei Transformatoren erinnert werden, welche zur Speisung eines thermischen Abbilds für die Überwachung der Wicklungstemperatur dienen. Entsprechend der Darstellung in Bild 9 ist dem Überwachungskreis ein variabler Shunt-Widerstand zur Einstellung des erwünschten Referenz-Stromes parallel geschaltet, um die Anzeige des thermischen Abbilds möglichst genau mit der gemessenen oder berechneten Wicklungstemperatur in Übereinstimmung bringen zu können. Für diesen Kreis können folgende Beziehungen aufgestellt werden:

$$I_S = I_T + I_R \quad (17)$$

$$I_R = I_T \cdot [R_T/(R_R+R_K)] \quad (18)$$

$$I_T = I_S \cdot [(R_R+R_K)/(R_T+R_R+R_K)] \quad (19)$$

Eine bestimmte Widerstandszunahme an den Kontakten oder am Abgriff dieses Widerstands ergibt eine entsprechende Stromzunahme im thermischen Abbild und damit die fälschliche Anzeige einer zu hohen Temperatur. Wie unterschiedlich sich dabei die Wahl des Sekundärstromes auf diese Fehlanzeige auswirken kann, ergibt sich aus den Beispielen der Tabelle VI, welche reinen Modellcharakter zum Aufzeigen der Problematik haben. Danach verursacht eine Widerstandszunahme am Regulierwiderstand von 100 mΩ bei 1 A Sekundärstrom einen Stromfehler im thermischen Abbild von 5%, während er bei 5 A bereits 75% beträgt.

In der Praxis hat dieser Umstand im Falle von Sekundärströmen weit über dem Betriebsstrom des thermischen Abbilds zu spontanen Netzabschaltungen geführt, weil durch die Oxidation des Abgriffs am Re-

	Sekundärstrom / Nennbürde		
	1 A/5 VA	5 A/5 VA	5 A/60 VA
Wandlerbelastung [VA]	5	5	101*
Messbürde [VA]	1	1	1
Restbürde für Kontaktwiderstand [VA]	4	4	100
Kontaktwiderstand [Ω]	4	0,16	4
Verluste im Kontaktwiderstand [W]	**4**	**4**	**100**

Tabelle V Verlustleistung eines Kontaktwiderstands

* Belastung oberhalb der Genauigkeitsgrenze

gulierwiderstand dessen Widerstandswert und damit der Betriebspunkt der Temperaturüberwachung im Wechselspiel mit der steigenden Kontakterwärmung unaufhaltsam bis auf unzulässige Werte anstieg. Deshalb hat sich die Erkenntnis durchgesetzt, dass eine möglichst gute Annäherung des Sekundärstromes an den betrieblich notwendigen Minimalwert in solchen Fällen das Risiko von Fehlanzeigen stark einzuschränken vermag.

	Sekundärstrom	
	1 A	5 A
Widerstand des thermischen Abbilds [W]	1	1
Soll-Strom des thermischen Abbilds [A]*	0,5	0,5
Soll-Strom des Regulierwiderstands [A]*	0,5	4,5
Soll-Wert des Regulierwiderstands [Ω]	1	0,111
Zunahme des Kontaktwiderstands [Ω]	0,1	0,1
Ist-Wert des Shuntwiderstands [Ω]	1,1	0,211
Ist-Strom des thermisches Abbilds [A]	0,523	0,872
Stromfehler des thermischen Abbilds	**≈5%**	**≈75%**

Tabelle VI Fehlerauswirkung eines Kontaktwiderstands * für Kontaktwiderstand R_K=0

Betrachtungen zu Überstromziffer, Klassengenauigkeit und thermischem Grenzstrom bei Stromwandlern

Je höher bei Stromwandlern die geforderte Überstromziffer ist, um so grösser muss der Querschnitt des Eisenkerns gewählt werden. So erfolgt beispielsweise die Zunahme an Kernmaterial für Klasse 5P40 gegenüber Klasse 5P10 praktisch im Verhältnis der Überstromziffern mit 4:1. Ebenso kann der Übergang zu einer höheren Genauigkeitsklasse ähnliche Auswirkungen haben. So wird für einen Kern der Klasse 5P20 bis zu 20% mehr Material benötigt als für einen der Klasse 10P20.

Entsprechend erhöht sich mit dem Kernvolumen die Menge des Leitermaterials der Sekundärwicklung und damit der Platzbedarf für den bewickelten Kern. Analoges gilt in verringertem Mass für Messkerne beim Übergang von Klasse 0,5 auf Klasse 0,2, oder es bedingt dies unter Umständen den Einsatz von wesentlich teureren Sondermaterialien.

Die Forderung nach Linearität bei Schutzkernen, weit über den höchsten in Frage kommenden Auslösestrom hinaus, und damit nach einer möglichst hohen Überstromziffer ist technisch ebensowenig begründbar wie diejenige nach einer Genauigkeit, welche über das unbedingt nötige oder durch die Norm vorgeschriebene Mass hinausgeht. Als überflüssige Sicherheitszuschläge würden beide die Wandler lediglich verteuern.

Dasselbe gilt übrigens auch für den thermischen Grenzstrom, welcher den Querschnitt der Primärwicklung mitbestimmt. Auch hier können überhöhte Werte eine grundlegend geänderte Wandlerkonfiguration mit entsprechendem Mehraufwand erforderlich machen.

Vorteile einer Leistungsanpassung bei Spannungswandlern

Risiko der Ferroresonanz bei induktiven Spannungswandlern in Abhängigkeit von der Leistung und Bebürdung

Es soll hier noch der Vollständigkeit halber daran erinnert werden, dass bei induktiven Spannungswandlern das Risiko der Ferroresonanz mit abnehmender Bebürdung zunimmt. Deshalb sollte ein solcher Wandler auf gar keinen Fall mit offenen Sekundärklemmen im Leerlauf betrieben werden. Bei zu schwacher Bürde wird deshalb als Gegenmassnahme oft ein Zusatzwiderstand sekundär parallel geschaltet, um den Wandler möglichst mit Nennlast zu betreiben. Hier ist ebenfalls die bestmögliche Absenkung der Nennbürde in Richtung der oftmals sehr niedrigen Betriebsbürden angezeigt, auch wenn dem aus mechanischen und elektrischen Gründen gewisse Grenzen gesetzt sind. Dies gilt um so mehr, als mit sinkender Nennbürde auch ein kleineres Kernvolumen benötigt wird. Damit vermindert sich die Möglichkeit zur Ausbildung von Ferroresonanzen entsprechend dem geringeren Energieinhalt im Magnetkreis des Wandlers.

Auswirkung einer Leistungsreduktion bei kapazitiven Spannungswandlern

Der klassische Spannungswandler nach dem Prinzip des kapazitiven Teilers mit induktiver Kompensations- und Anpasseinrichtung kann zwar die oft noch verlangten, hohen Leistungswerte erbringen. Er kommt aber für auf 2–3 VA reduzierte Leistungsanforderungen mit entsprechend kleineren Teilerkapazitäten und induktiven Bauteilen aus. Dies sei anhand der Prinzipschaltbilder in Bild 10 näher erläutert.

Zur weiteren Betrachtung werden folgende Beziehungen verwendet (mit f: Frequenz [Hz], Q: Güte der Messanordnung [p.u.], C_T: Teilerkapazität [F], S_T: Teilerblindleistung [VA], $ü$: Teilerübersetzung [p.u.], U_T: Teilerspannung ohne Last [kV], S_B: Belastungsleistung [VA], I_B: Belastungsstrom [A], S_R: Blindleistung der Resonanzdrossel [VA], F: Messfehler [%]):

$$L_R = 1/[(2\cdot\pi\cdot f)^2\cdot(C_1+C_2)] \quad (20)$$

$$Q = 2\cdot\pi\cdot f\cdot L_R/R_V \quad (21)$$

$$C_T = C_1\cdot C_2/(C_1+C_2) \quad (22)$$

$$S_T = 2\cdot\pi\cdot f\cdot C_T\cdot U_P^2 \quad (23)$$

$$ü = (C_1+C_2)/C_1 \quad (24)$$

$$U_T = U_P/ü \text{ für } Z_B=\infty \quad (25)$$

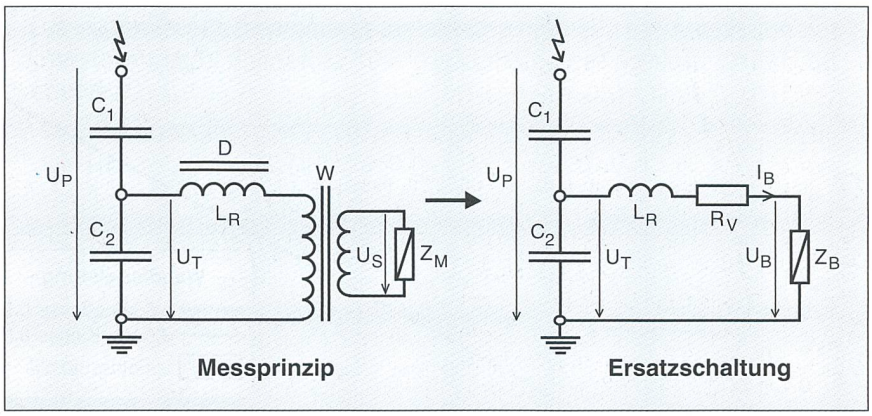

Bild 10 Schaltbilder des kapazitiven Spannungswandlers

C_1 Hochspannungskapazität [F]
C_2 Ankopplungskapazität [F]
D Resonanzdrossel
W Anpassungswandler
L_R Induktivität Resonanzdrossel [H]
Z_M Messimpedanz [Ω]
Z_B Belastungsimpedanz [Ω]
U_P Primärspannung [kV]
U_T Teilerspannung [kV]
U_S Sekundärspannung [kV]
U_B Belastungsspannung [kV]
I_B Belastungsstrom [A]
R_V Verlustleistungswiderstand der gesamten Anordnung [W]

$$S_B = I_B^2 \cdot Z_B = I_B \cdot U_B \quad (26)$$

$$I_B = S_B / U_B = S_B \cdot \ddot{u} / U_P \quad (27)$$

$$S_R = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_R \cdot I_B^2 = (\ddot{u}/2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_1) \cdot (S_B^2 / U_P^2) \quad (28)$$

$$F = [(\ddot{u}-1)/Q)] \cdot (S_B/S_T) \cdot (100\%) \quad (29)$$

Damit ergeben sich aus den vorstehenden Ausdrücken für die Messanordnung mit gegebener Güte in Abhängigkeit vom tolerierbaren Messfehler eine maximal zulässige Belastungsleistung und damit die maximal zulässige Messbürde wie folgt (mit S_{Bmax}: maximale Belastungsleistung [VA], S_{Mmax}: maximale Messbürde [VA]):

$$S_{Bmax} = (F/100) \cdot (Q \cdot S_T) / (\ddot{u}-1) \quad (30)$$

$$S_{Mmax} \leq S_{Bmax} \quad (31)$$

Auf dieser Grundlage wurden die Werte für zwei Beispiele in Tabelle VII zusammengestellt. Mit dem Verzicht auf hohe Ausgangsleistungen, wie zum Beispiel in b) gegenüber a), können demnach kleinere Kapazitäten für die Spannungsteilung verwendet werden. Dadurch wird eine vereinfachte Bauweise nach dem längst bekannten und auch verbreiteten Prinzip der Kondensatordurchführung mit kapazitivem Potentialabgriff und Kompensationseinrichtung (Potential device) möglich. Für den Abgriff kann man zudem eine Teilerspannung in der Grössenordnung von 3000 V wählen und deshalb für die Resonanz- und Spannungsanpassung mit trocken isolierten Bauteilen auf relativ niedrigem Spannungsniveau auskommen. Infolge des verringerten Leistungsbedarfs ergibt sich für diese Komponenten auch ein wesentlich kleineres Bauvolumen, was zum Beispiel aus der rund 100mal kleineren Blindleistung der Resonanzdrossel hervorgeht. Trotz Einschränkung des zugelassenen Messfehlers für eine Kondensatordurchführung mit erhöhtem Temperaturgang der Kapazität im Falle b) steht auch für zwei Sekundärwicklungen des Anpassungswandlers mit 2 · 4,5 VA = 9 VA genügend Leistung zur Verfügung. Solche Spezialdurchführungen mit Potentialabgriff können Bestandteile von Transformatoren, Schaltern oder Stromwandlern sein und in dieser Kombination zu kostengünstigeren Lösungen führen.

Abweichung von der Klassengenauigkeit bei schwacher Bebürdung von Wandlern hoher Leistung

Bei konventionellen Wandlern höherer Leistung kann die Klassengenauigkeit ohne verteuernde Massnahmen vielfach nur in einem begrenzten Belastungsbereich eingehalten werden. Wandler für Messzwecke werden nach den geltenden Normen deshalb so ausgelegt, dass ihre Klassengenauigkeit im Bereich von 25 bis 100% der Nennbürde und von 5 bis 120% des Nennstroms bei Stromwandlern beziehungsweise von 80 bis 120% der Nennspannung bei Spannungswandlern sicher garantiert werden kann. Wird nun ein solcher Wandler höherer Leistung nur noch mit weniger als 25% bebürdet, kann er durchaus seine Fehlergrenze überschreiten, wie aus dem etwas vereinfacht dargestellten Prinzipverlauf des Fehlers nach Bild 11 hervorgeht. Dies gilt übrigens in sehr ähnlicher Weise sowohl für Strom als auch für Spannungswandler. Für den Betrieb unterhalb 120% des Primärnennwertes wird diese Erscheinung eher noch verstärkt.

Aus diesem Grund müssen Wandler für Zähler zu Verrechnungszwecken mit einer Zusatzbürde in Form eines Widerstandes versehen werden, falls die Bürde der Messeinrichtung und der Signalleitung zusammen unterhalb von 25% der Wandlernennbürde bleiben. Dies wäre zum Beispiel für einen Wandler mit 60 VA der Klasse 0,5 bei einer Bürde von nur 2 VA mit einem positiven Fehler zugunsten der Energieverrechnungsstelle von bis zu 0,7% klar der Fall. Für einen Wandler der Klasse 0,5, welcher mit nur 5 VA Leistung derselben Bürde von 2 VA weit besser angepasst ist, würde der Fehler unabhängig von der Belastung im gesamten Bereich von 0 bis 5 VA den Grenzwert von 0,5% dagegen nie überschreiten.

Ein vermeintlicher Sicherheitszuschlag bei der Wandlerleistung kann deshalb dasselbe wie eine geringere Genauigkeitsklasse bedeuten, falls dadurch die Anpassung an die betriebswirksame Bürde verschlechtert wird. Deshalb sollten auch im Interesse der Messgenauigkeit für schwach belastete Wandler entsprechend niedrige Nennbürden gewählt werden.

Abschliessende Betrachtungen

Die Senkung der Leistungsanforderungen für konventionelle Messwandler auf das unbedingt notwendige Minimum führt

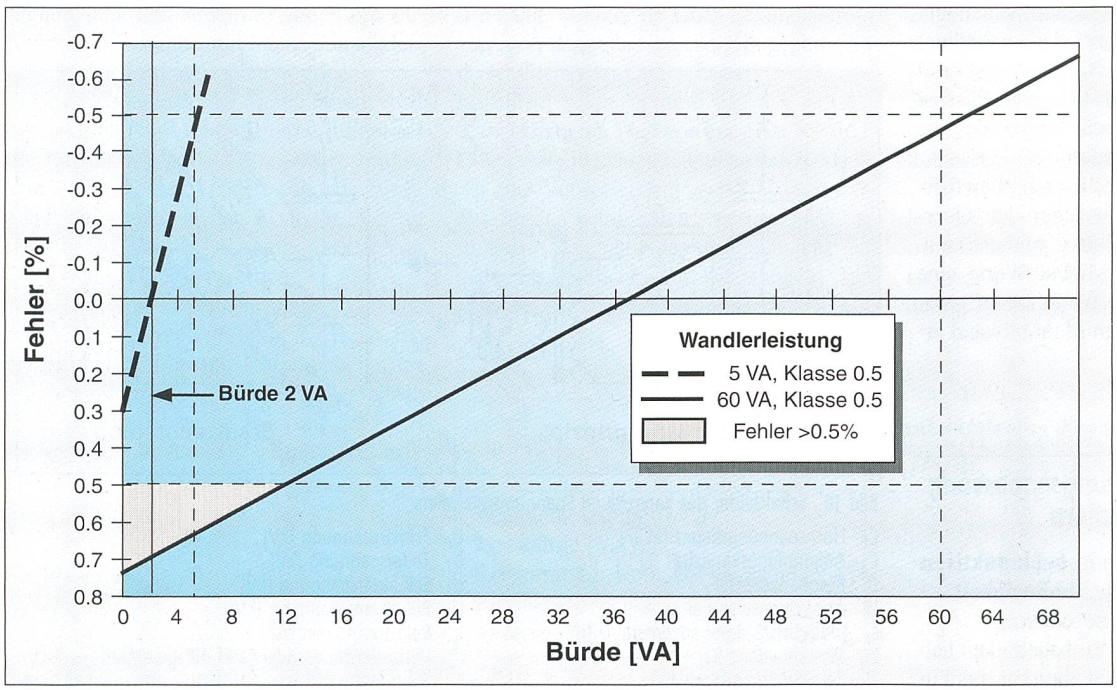

Bild 11 Wandlerfehler in Funktion der Bürde bei 120% des Primär-Nennwertes

Vergleichsgrössen	a) konventionell	b) möglich
Primärspannung [kV] (verkettet)	220	220
Sekundärspannung [V]	100	100
Frequenz [Hz]	50	50
Fehlerklasse [%]	0,5	0,5
Hochspannungskapazität [pF]	1810	1030
Ankopplungskapazität [pF]	18100	35000
Teilerkapazität insgesamt [pF]	1645	1000
Teilerübersetzung [p.u.]	11	35
Teilerblindleistung [VA]	8340	5070
Teilerspannung am Abgriff [kV]	11,5	3,6
Blindleistung Resonanzdrossel [VA]	48	0,54
Güte der Messanordnung [p.u.]	30	15
Zugelassener Messfehler [%]	0,8	0,4*
Maximale Belastungsleistung [VA]	200	9
Zulässige Nennbürde [VA]	**200**	**9**

Tabelle VII Zulässige Bürde bei kapazitiven Spannungswandlern

* Einschränkung zur Abdeckung des Zusatzfehlers durch die Resonanzverstimmung infolge der Kapazitätsänderung mit der Temperatur bei einer Kondensatordurchführung.

vielfach zu technisch einfacheren und kostengünstigeren Lösungen. Da bei sonst unveränderten Messprinzipien immer noch ein ausreichend starkes und stabiles Messsignal zur Verfügung steht, ist damit nicht die geringste Einbusse an Messgenauigkeit oder betrieblicher Sicherheit verbunden. In vielen Fällen ist dank der Vereinfachung ganz im Gegenteil eine erhöhte Zuverlässigkeit die Folge. Eine verbesserte Anpassung der Wandlerleistungen an die effektive Belastung ist deshalb im Falle von niedrigen Messbürden und vernachlässigbaren oder stark reduzierbaren Signalübertragungsverlusten durchwegs empfehlenswert. Insbesondere bei Stromwandlern hat die Wahl von 1 A als Sekundärstrom ganz entschiedene Vorteile. Gleichzeitig ist unbedingt auch ein Verzicht auf unbegründbare Genauigkeits- und Linearitätsansprüche sowie Grenzstrombedingungen anzuraten. Dies alles kann abgesehen von Materialeinsparungen die Einhaltung der Klassengenauigkeit im in Frage kommenden Bürdenbereich erleichtern. Ein kleinerer Strom und die damit höhere verfügbare Spannung im Sekundärkreis erhöht zudem dessen Unempfindlichkeit gegenüber Kontaktproblemen. Bei induktiven Spannungswandlern verringert eine optimale Leistungsanpassung und Bebürdung zudem das Risiko von Ferroresonanz-Überspannungen.

Um optimale Auslegungsparameter in der genannten Richtung zu finden, ist oftmals eine kritische Bedürfnisabklärung und eine enge Zusammenarbeit mit entsprechendem Informationsaustausch zwischen Betreibern und Herstellern von Wandlern für Messung und Schutz bereits zum Zeitpunkt der Gerätespezifikation von entscheidender Bedeutung. Allein schon mit Rücksicht auf vorhandene Konstruktionen und Fertigungsmittel werden sich so auch einige Probleme mit der Unterbringung der Wandler-Aktivteile innerhalb gegebener Abmessungen oder gar teure Sonderanfertigungen vermeiden lassen. Dies trifft vor allem für kunstharzisolierte Wandler mit fest vorgegebenen Giessformen in Standardausführung zu.

Interessanterweise eröffnen sich dadurch aber auch neue Möglichkeiten für die Weiterentwicklung der bisherigen Messwandlertypen in Richtung von vereinfachten und damit kostengünstigeren Messwertgebern kleinerer Leistung nach dem klassischen induktiven und kapazitiven Prinzip, als Alternative zu den nicht konventionellen, optoelektronischen Sensoren. Mit Nennbürden im Bereich von 2 bis 3 VA sind sie ohne weiteres noch innerhalb der heutigen Schutz- und Messsysteme mit Einzelgeräten für die Signalverarbeitung auf elektronischer Basis einsetzbar. Für Wandler in Mittelspannungsschaltfeldern mit sehr kurzen Signalleitungen und deshalb mit praktisch vernachlässigbaren Zusatzbürden sind noch geringere Leistungen und Sekundärströme sinnvoll und bereits auch in Anwendung. In Verbindung mit Umsetzern für die optoelektronische, digitale Signalübertragung und -verarbeitung auf Niederspannungsebene können sie auch beim Übergang auf zukünftige integrierte Leitsysteme dank ihres niedrigen Leistungsangebots weiterhin eine angemessene Verwendung finden.

Die Nutzung solcher Sparpotentiale im Messwandlerbereich, so begrenzt diese im Rahmen einer Gesamtanlage auch sein mögen, gewinnt überdies im Interesse der Schonung unserer endlichen Ressourcen und der Einschränkung des Entsorgungsvolumens von Reststoffen immer stärker an Bedeutung.

Utilisation optimisée de transformateurs de mesure

Les systèmes électroniques appellent une nouvelle harmonisation des transformateurs de mesure avec transmission des signaux, protection et mesure

Pour les transformateurs de mesure classiques en liaison avec des appareils électroniques de mesure et de protection dans les installations électriques moyenne et haute tension, on montre les liens existants entre la charge et les exigences imposées à la puissance compte tenu de la transmission des signaux. La faible puissance nécessaire des systèmes électroniques permet une réduction correspondante de la puissance des transformateurs en général. Concernant les transformateurs d'intensité, on peut outre cela représenter comme extrêmement avantageux le choix de l'intensité secondaire de 1 ampère au lieu de 5 ampères. L'abaissement des charges des transformateurs pour harmoniser les charges efficaces en exploitation s'avère de toute façon indiqué eu égard à l'observation de la précision de classe, et concernant les transformateurs d'intensité en vue d'éviter les ferrorésonances. On justifie et recommande de renoncer à des exigences de linéarité et de précision le cas échéant inutiles ainsi qu'à des conditions d'intensité limite. Les simplifications et économies ainsi réalisables ouvrent de nouvelles possibilités de développement et sont d'une importance croissante à tous les égards techniques et économiques, surtout quand il s'agit de ménager nos ressources limitées et de limiter le volume de matières résiduaires à éliminer.

Der Aufschwung hat begonnen!

Zeit für Ihre Anzeigen-Werbung im Bulletin SEV/VSE

Gewinne			